

УДК 621.9(075.8)

В.В. Ступницький, д-р техн. наук., Н.В. Ступницька, канд. техн. наук,
Львів, Україна

МЕТОДОЛОГІЯ ПРОЕКТУВАННЯ ОБ'ЄКТНО-ОРІЄНТОВАНИХ ТА ФУНКЦІОНАЛЬНО-ОРІЄНТОВАНИХ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПРОЦЕСІВ МАШИНОБУДІВНОГО ВИРОБНИЦТВА

В статті наведені принципи, переваги та особливості концепцій об'єктно-орієнтованого та функціонально-орієнтованого технологічного проектування виробничих процесів машинобудування. Для реалізації паралельного інжинірингу, впровадження PLM-технологій запропоновано використання системи реологічного імітаційного моделювання процесів формоутворення деталей (CAF-системи). Це дасть можливість прогнозування основних кваліметричних експлуатаційних властивостей виробу вже на стадії технологічної підготовки машинобудівного виробництва.

Ключові слова: об'єктно-орієнтоване проектування, функціонально-орієнтоване проектування, виробничі процеси

В статье приведены принципы, преимущества и особенности концепций объектно-ориентированного и функционально-ориентированного технологического проектирования производственных процессов машиностроения. Для реализации параллельного инжиниринга, внедрения PLM-технологий предложено использование системы реологического имитационного моделирования процессов формообразования деталей (CAF-системы). Это даст возможность прогнозирования основных кваліметрических эксплуатационных свойств изделия уже на стадии технологической подготовки машиностроительного производства

Ключевые слова: объектно-ориентированное проектирование, функционально-ориентированное проектирование, производственные процессы

The article presents the principles, advantages and disadvantages of the object-oriented and functional-oriented process concepts in designing industrial processes engineering. For implementation of the concurrent engineering, PLM-technologies proposed use of rheological simulation of cutting process (CAF-system). It will make possibility to key performance properties qualimetric product at the stage of functional process design parameters of the structure and operations processing machine products manufacturing.

Keywords: object-oriented designing, functional-oriented designing, industrial processes

Ефективна реалізація етапу технологічної підготовки виробництва є найбільш складним, трудомістким і багатоваріантним завданням в системі забезпечення життєвого циклу виробів. У традиційних інтегрованих системах автоматизованої технологічної підготовки машинобудівного виробництва використовується класичний алгоритм технологічного проектування, що передбачає виконання ряду послідовних взаємопов'язаних етапів безітераційного низхідного структурно-параметричного синтезу. Тобто, спочатку на основі вхідних даних (як результат роботи CAD і CAE-систем:

макрогеометрична конфігурація деталі, матеріал, її розмірно-вагові характеристики, точність геометричних розмірів та взаєморозташування поверхонь, фізико-механічний стан функціональних поверхонь деталі, тип та організаційна форма виробництва) засобами формальної ревалентності формується маршрут механічного оброблення виробу, потім визначається структура технологічних операцій, переходів, призначаються режими оброблення (CAPP-система), а відтак проектується або підбирається технологічне оснащення, інструмент, складається програма для верстатів з ЧПК (CAM-система). Таке проектування в класифікаційному контексті забезпечення поставленої мети можна вважати об'єктно-орієнтованим [1,2,3]. При цьому технолог (або автоматизована технологічна система) повністю абстрагується від проблем функціонального (експлуатаційного) характеру об'єкту виробництва, справедливо вважаючи, що призначення вихідних даних та граничних умов для технологічного проектування (в класичному сенсі - норм точності та якості окремих поверхонь виробу) – це прерогатива конструктора (або автоматизованої CAD/CAE системи) [4]. Проте, копіювання класичного алгоритму прийняття технологічних рішень істотно обмежує потенціал інтегрованої автоматизованої системи підготовки виробництва, не дає можливості комплексної реалізації системи PLM (*Product Life Management*). Очевидно, що в умовах реальної інженерної практики прогнозування функціональних особливостей виробу і пов'язане з ним призначення норм точності і якості окремих поверхонь виконується конструктором апіорно. Проте, навіть досвідчені конструктори не в змозі системно оцінити вплив таких важливих чинників, як мікротопологія поверхонь, залишкові напруження і деформації поверхневого шару на показники зносостійкості, втомну міцність, мастилоутримуючі і антикорозійні властивості поверхонь і т.п.!

Об'єктно-орієнтоване проектування - проектування складної системи як сукупності об'єктів, що взаємодіють один з одним, кожен з яких - екземпляр певного класу, з використанням принципів абстрагування, модульності, ієрархічності та спадковості властивостей. Комплекс робіт, пов'язаний з технологічним проектуванням нових виробів, включає в себе послідовність робіт по проектуванню, складанню, підготовки технічної документації, їх експериментально-дослідному випробуванню, аналізу експериментальних результатів з рекурентним повторенням циклу аж до отримання потрібного результату (табл.1). Тобто, спочатку виконується попередній проект технологічного процесу; на подальших стадіях його уточнюють і конкретизують на основі детальних технологічних розрахунків. Послідовним уточненням попереднього проекту отримують остаточний варіант технологічного процесу. Найбільш ефективне рішення вдається отримати тільки після розробки і порівняння декількох варіантів технологічних процесів. І основним критерієм такого проектування є забезпечення мінімальної

собівартості виробу за умови забезпечення формалізованих показників якості і заданих виробничою програмою об'ємів виготовлення продукції.

Об'єктивні умови розвитку ринкової економіки в сучасних умовах глобалізованого суспільства визначають необхідність цільової орієнтації наукових досліджень, процесів проектування та виробництва продукції машинобудування на формування більш високого рівня якості, ніж у конкурентів протягом всього життєвого циклу продукції [5]. В результаті поступового насичення ринку взаємозамінними виробами-аналогами, ефективність цінової конкуренції знижується, а нецінової (як результат підвищення якості та вдосконалення експлуатаційних та сервісних властивостей виробів) - підвищується, що обумовлює актуальність пошуку нових критеріїв оцінки і технологій управління якістю різноманітних технічних систем на кожному з етапів його життєвого циклу. Структурованість якості складає основу фундаментального для кваліметрії принципу функціонально-кібернетичної еквівалентності [6]. Таким чином, впровадження PLM вимагає проектування функціонально-орієнтованих технологій машинобудівного виробництва, тобто врахування вже на стадії технологічної підготовки виробництва не тільки параметрів точності розмірів та шорсткості оброблюваних поверхонь, але й системного комплексу кваліметричних показників, що матимуть суттєвий вплив на забезпечення експлуатаційних, ремонтних, утилізаційних та інших функціональних властивостей виробів [6]. При реалізації функціонально-орієнтованої технологічної підготовки виробництва система не підміняє результати роботи конструктора, а лише доповнює їх такими важливими критеріями, як мікротопологія поверхневого шару, залишкові напруження та деформації тощо [7].

Протягом останніх років формується якісно новий науковий етап розвитку технології машинобудування, що полягає в об'єднанні технологій проектування, виготовлення і експлуатації машин і в розробці наукових основ по системному створенню нових технологічних методів обробки, в тому числі і механо-фізико-хімічних, що дозволяють забезпечити необхідні експлуатаційні властивості деталей машин. Запропонований у роботі [6] підхід у реалізації функціонально-орієнтованих технологій базується на багаторівневому проектуванні структури технології на кількох рівнях. Між окремими рівнями діють ітераційні та рекурентні зв'язки, що дозволяє синтезувати і коректувати структуру технологічного процесу на базі принципів комбінованих технологій; макро-, мікро- і нанотехнологій та функціонально-орієнтованих технологій. По-суті це і є реалізацією принципу паралельного інжинірингу. Ітераційні і рекурентні зв'язки між окремими етапами проектування технологій дозволяють, по перше - послідовно виконувати синтез структури технологічного процесу на базі всіх етапів композиційних технологій, по-друге - виконувати повернення процесу проектування на попередні етапи, коректуючи розроблену раніше структуру і параметри технологічного процесу,

і по-третє – при синтезі технології обходити окремі етапи проектування як в прямому, так і в зворотному напрямках [5].

В роботі [6] наголошується, що процес врахування особливостей функціонально-орієнтованих технологій слід реалізувати на всіх етапах життєвого циклу виробу, а саме: аналізу виробу, конструкторського проектування, виготовлення, функціонування, модернізації та утилізації. Причому необхідно враховувати всі експлуатаційні особливості виробу в машині. Це і зосереджені контактні напруження, і нерівномірний розподіл питомих навантажень, залишкових напружень розтягу, стиску, згину, процесів зношування та втомної міцності елементів тощо.

В роботах [6, 7] сформульовані основні принципи створення функціонально-орієнтованих технологій, що базуються на таких положеннях:

1. У технології машинобудуванні кожен виріб прийнято розбивати на виконавчі поверхні, і технологічний процес проектувати, ґрунтуючись на визначеній послідовності забезпечення властивостей цих виконавчих поверхонь.

2. Між конструктивно-точнісними властивостями кожного функціонального елемента виробу, особливостями його експлуатації в машині і технологічними операціями та переходами їх оброблення існують певні зв'язки. Ці зв'язки в функціонально-орієнтованих технологіях необхідно встановити і формалізувати.

3. Реалізацію технологічних впливів на кожен функціональний елемент виробу необхідно виконувати з можливістю забезпечення зміни його властивостей у просторі і в часі залежно від особливостей експлуатації функціонального елемента виробу в машині або технологічній системі, а також залежно від заданого, необхідного або граничного експлуатаційного потенціалу виробу в цілому.

Таким чином, зв'язок між функціональними властивостями виробу та технологією їх забезпечення повинен носити прогностичний характер. Очевидно, що експериментальні дослідження у випадку необхідності прийняття оперативного технологічного рішення є вкрай небажаними через значну трудомісткість та відсутність можливості диференційованого аналізу впливу окремих чинників на результат проектування. Наприклад, аналіз впливу геометрії різального інструменту, його коливань у всіх напрямках, деформаційні явища (в т.ч. залишкові) мають суттєвий вплив на мікротопографію поверхні. Проте проаналізувати їх вплив диференційовано можна лише використавши можливості комплексного імітаційного реологічного та аналітичного моделювання, а експериментальним шляхом можна лише підтвердити адекватність їх сукупного впливу на формування мікрогеометрії остаточно [9]. Таким чином, для інтегрованої системи автоматизованої підготовки машинобудівного виробництва можна використати 2 альтернативні концепції технологічного проектування - об'єктно-орієнтоване (ООТ) (табл. 1) та функціонально-орієнтоване проектування (ФОТ) (табл. 2).

Таблиця 1 – Загальна характеристика об'єктно-орієнтованих технологій машинобудування

Вхідні дані для проектування	Джерела надходження вхідної інформації	Принцип побудови та критерії оптимізації структури і параметрів технологічного процесу	Переваги об'єктно-орієнтованого проектування	Недоліки та проблеми реалізації об'єктно-орієнтованого проектування
Макрогеометрична конфігурація деталі	Проектно-конструкторська документація, система CAD, система MasterCAE	Принцип побудови структури технологічного процесу: Метод аналізу: алгоритмічний пошук структурного прототипу за конструкторсько-технологічними ознаками і корекція його параметрів у відповідності до вхідних даних на проектування	Адекватність формалізації вхідної інформації	Неможливість врахування функціональних властивостей деталі в умовах її майбутньої експлуатації
Матеріал деталі			Наявність ґрунтовної теоретичної бази знань для прийняття оптимального технологічного рішення	
Розмірно-вагові характеристики			Алгоритмічна простота технологічного проектування	
Точність геометричних розмірів			Наявність значної кількості програмних продуктів, що реалізують принцип прототипування технологічних рішень (CAPP та CAM системи)	
Точність взаєморозташування поверхонь	Організаційна та проектно-конструкторська документація, програма випуску продукції	Критерії оптимізації: забезпечення мінімальної собівартості виготовлення об'єкту виробництва при дотриманні формалізованих показників якості і заданих виробничою програмою об'ємів виготовлення продукції, з урахуванням технологічної спадковості існуючого виробництва	Жорсткість; відсутність ітераційних та рекурентних зв'язків з іншими етапами інтегрованої системи технологічної підготовки виробництва	Структурна жорсткість; відсутність ітераційних та рекурентних зв'язків з іншими етапами інтегрованої системи технологічної підготовки виробництва
Фізико-механічний стан функціональних поверхонь деталі				Неповна відповідність концепції PLM проектування
Тип та організаційна форма виробництва				Неможливість реалізувати принцип паралельного інжинірингу

Таблиця 2 – Загальна характеристика функціонально-орієнтованих технологій машинобудування

Вхідні дані для проектування	Джерела надходження вхідної інформації	Принципи побудови структури і параметрів технологічного процесу	Переваги функціонально-орієнтованого проектування	Недоліки та проблеми функціонально-орієнтованого проектування
Геометрична форма окремої функціональної поверхні деталі	Проектно-конструкторська документація, система CAD	Метод синтезу: алгоритмічний синтез оптимальної структури та параметрів окремих технологічних переходів, операцій, що базується на прогностичних результатах імітаційного моделювання напружено-деформованого та термодинамічного стану виробу в процесі його формування	Формалізація рекурентних зв'язків між результатами технологічного проектування та умовами експлуатації виробу дає змогу забезпечити оптимальний комплекс його функціональних кваліметричних показників	Складність врахування макроегеометричних параметрів деталі для формування структури технологічного процесу
Специфікація матеріалу деталі (в т.ч. аналітичні залежності його дислокаційної кінетики, крива термо-деформаційного зміщення, критерії руйнування тощо)	Спеціалізована база даних			
Мікротопологія поверхневого шару окремої функціональної поверхні деталі	Проектно-конструкторська документація, система CAF, система CAPP, система CAE (в т.ч. MacroCAE, MicroCAE, NanoCAE)	Повна відповідність концепції PLM	Забезпечення системної інтеграції автоматизованих систем технологічної підготовки виробництва (CAD/CAE/CAPP/CAF /CAM) засобами паралельного інжинірингу	Необхідність структурної інтеграції та забезпечення єдиного формату обміну даних між окремими CAD/CAE/CAPP/CAF /CAM системами
Залишкові напруження (I, II і III роду)				
Напружено-деформований та термодинамічний стан заготовки в зоні стружкуутворення				
Наклеп поверхневого шару окремої функціональної поверхні				Необхідність суттєвого вдосконалення існуючої CAE системи (MicroCAE, NanoCAE)

Співставлення вищенаведених концепцій технологічного проектування, дозволяє зробити наступні висновки:

1. Методологічні принципи побудови ООТ та ФОТ суттєво відрізняються. Так, основним критерієм при оптимізації структури і параметрів об'єктно-орієнтованого технологічного процесу є мінімальна собівартість виготовлення об'єкту виробництва при дотриманні формалізованих показників якості і забезпечення заданих виробничою програмою об'ємів виготовлення продукції, з урахуванням технологічної спадковості існуючого виробництва. При виборі оптимального функціонально-орієнтованого технологічного процесу функцією мети є інтегральний кваліметричний показник, що системно характеризує комплекс експлуатаційних характеристик поверхонь виробу і отримується як результат формування в процесі формоутворення мікротопології поверхневого шару, залишкових напружень і деформацій.

2. Основною перевагою ООТ є алгоритмічна простота технологічного проектування та наявність ґрунтовної теоретичної бази знань для прийняття оптимального технологічного рішення. Проте, така методологія не повністю відповідає концепції PLM (через неможливість врахування функціональних властивостей деталі в умовах її майбутньої експлуатації), та не допускає можливості реалізації принципу паралельного інжинірингу (внаслідок відсутності ітераційних та рекурентних зв'язків з іншими етапами інтегрованої системи підготовки виробництва).

3. Основною проблемою впровадження ФОТ є складність структурної інтеграції та забезпечення єдиного формату обміну даних між окремими CAD/CAE/CAPP/CAF/CAM системами (CAPE технологія). Проте виконання цієї вимоги у будь-якому випадку декларується міжнародним стандартом ISO 10303. Перевагою даної методології є повне забезпечення вимог концепції PLM в частині формалізації рекурентних зв'язків між результатами технологічного проектування та умовами експлуатації виробу, що дає змогу забезпечити оптимальний комплекс його функціональних кваліметричних показників. Таким чином відбувається системна інтеграція автоматизованих систем технологічної підготовки виробництва (CAD/CAE/CAPP/CAF/CAM) засобами паралельного інжинірингу.

4. Впровадження функціонально-орієнтованого технологічного проектування ставить проблему суттєвого вдосконалення існуючого комплексу CAD/CAE/CAPP/CAM програмних продуктів шляхом впровадження автоматизованої технологічної системи формоутворення виробу (CAF – системи) та модернізації існуючої CAE системи (розробка підсистем MicroCAE та NanoCAE).

5. Приймаючи до уваги позитивні та негативні особливості використання альтернативних концепцій технологічного проектування, можна рекомендувати застосування алгоритму вибору оптимальної структури

та параметрів технологічних процесів за концепцією функціонально-орієнтованого проектування тільки для деталей, які мають функціонально-важливі поверхні, що підлягають в процесі експлуатації підвищеним механічним, температурним, хімічним, триботехнічним навантаженням або їх поєднанням. Але саме такі деталі найчастіше забезпечують експлуатаційну якість виробу в цілому. Для виробів, які не відповідають цим умовам функціонування, доцільно використовувати алгоритм, що реалізує традиційну концепцію об'єктно-орієнтованого технологічного проектування. Проте, найбільш оптимальною методологією є комбінування альтернативних концепцій проектування, що полягає у попередньому пресинтезі структури і параметрів технологічного процесу з врахуванням макрогеометричних показників виробу (етап об'єктно-орієнтованого проектування) і наступній корекції цих технологічних параметрів, виходячи із змодельованих потенційних та критичних умов майбутньої експлуатації цього виробу (етап функціонально-орієнтованого проектування). Таким чином можна оптимізувати за критерієм складності процес технологічної підготовки виробництва, максимально використавши потенціал існуючих програмних продуктів АСТПВ, реалізуючи при цьому PLM-технологію.

Список використаних джерел: 1. *Ступницький В.В.* Проектування функціонально-орієнтованих технологій механічного оброблення деталей засобами паралельного інжинірингу / *В.В.Ступницький* // Вісник Донецького національного технічного університету «Прогресивні технології і системи машинобудування». - 2013.- Вип.1 (45). - 2 (46). - с. 249-256. 2. *Ступницький В.В.* Концептуальні особливості проектування об'єктно-орієнтованих і функціонально-орієнтованих технологій машинобудування / *В.В.Ступницький* // Сборник трудов XX Международной научно-технической конференции «Машиностроение и техносфера XXI века. - Том 3. - Донецьк.- 2013. - С.55-60. 3. *Ступницький В.В.* Структура та функції системи автоматизованої технологічної підготовки машинобудівного виробництва на основі концепції функціонально-орієнтованого проектування операцій / *В.В.Ступницький* // Міжнародний науковий журнал «Технологічні комплекси», Луцьк. - 2013.- №2(8). - С.65-71. 4. ISO/IEC 12207:2008 Systems and software engineering - Software life cycle processes. [Електронний ресурс]: Режим доступу: <http://www.iso.org>. 5. *Кульга К.С.* Автоматизация технической подготовки и управления производством на основе PLM-системы / *К.С.Кульга*. - М.: Машиностроение, 2008. - 265 с. 6. *Гутирра С.С.* Системное моделирование качества механизмов и машин / *С.С.Гутирра* // Одесса: Труды Одесского политехнического университета.- 2003. - Вып. 2 (20). - С. 14-21. 7. *Михайлов А.Н.* Основы синтеза функционально-ориентированных технологий / *А.Н.Михайлов*. - Донецк: ДонНТУ, 2009. - 346 с. 8. *Суслов А.Г.* Инженерия поверхности деталей / *А.Г.Суслов*. - М.: Машиностроение, 2008. - 320 с. 9. *Faassen R.P.H.* Prediction of regenerative chatter by modelling and analysis of high-speed milling/ *R.P.H.Faassen, N.Van de Wouw, J.A.J.Oosterling, H.Nijmeijer*. - Amsterdam: Elsevier // International Journal of Machine Tools & Manufacture. - 2003.- №43. - pp.1437-1446. 10. *Валетов В.А.* Автоматизированная система непараметрической оценки микрогеометрии поверхности / *В.А.Валетов, Д.В.Васильков, А.В.Воронин* // Машиностроение и автоматизация производства. Межвуз. сб. научн. тр. - СПб.: СЗПИ, 1995. - С. 54- 67.103

Bibliography (transliterated): 1. *Stupnic'kij V.V.* Proektuvannja funkcional'no-orientovanih tehnologij mehanichnogo obrobennja detalej zasobami paralel'nogo inzhiniringu / *V.V.Stupnic'kij* // Visnik Donec'kogo nacional'nogo tehničnogo universitetu «Progresivni tehnologiji i sistemi

mashinobuduvannya». – 2013. Vip.1 (45). – 2(46). – s. 249-256. **2.** *Stupnickij V.V.* Konceptual'nye osobennosti proektirovanija ob'ektno-orientirovannyh i funkcional'no-orientirovannyh tehnologij mashinostroenija / *V.V.Stupnickij* // Sbornik trudov XX Mezhdunarodnoj nauchno-tehnicheskoy konferencii «Mashinostroenie i tehnosfera XXI veka. – Tom 3. – Donec'k. – 2013. – S.55-60.

3. *Stupnic'kij V.V.* Struktura ta funkcii sistemi avtomatizovanoi tehnologichnoi pidgotovki mashinobudivnogo virobnictva na osnovi koncepcii funkcional'no-orientovanogo proektuvannja operacij / *V.V.Stupnic'kij* // Mizhnarodnij naukovij zhurnal «Tehnologichni kompleksi», Luc'k. – 2013. – №2(8). – S.65-71. **4.** ISO/IEC 12207:2008 Systems and software engineering - Software life cycle processes. [Elektronnij resurs]: Rezhim dostupu: <http://www.iso.org>. **5.** *Kul'ga K.S.* Avtomatizacija tehniceskoy podgotovki i upravljenja proizvodstvom na osnove PLM-sistemy / *K.S.Kul'ga*. – M.: Mashinostroenie, 2008. – 265 s. **6.** *Gutyryja S.S.* Sistemnoe modelirovanie kachestva mehanizmov i mashin / *S.S.Gutyryja* // Odessa: Trudy Odesskogo politehnicheskogo universiteta. – 2003. – Vyp. 2 (20). – S. 14-21.

6. *Mihajlov A.N.* Osnovy sinteza funkcional'no-orientirovannyh tehnologij / *A.N.Mihajlov*. – Donec'k: DonNTU, 2009. – 346 s. **7.** *Suslov A.G.* Inzhenerija poverhnosti detalej / *A.G.Suslov*. – M.: Mashinostroenie, 2008. – 320 s. **8.** *Faassen R.P.H.* Prediction of regenerative chatter by modelling and analysis of high-speed milling/ *R.P.H.Faassen, N.Van de Wouw, J.A.J.Oosterling, H.Nijmeijer*. Amsterdam: Elsevier // International Journal of Machine Tools & Manufacture. 2003. – №43. – pp.1437-1446. **9.** *Valetov V.A.* Avtomatizirovannaja sistema neparametricheskoy ocenki mikrogeometrii poverhnosti / *V.A.Valetov, D.V.Vasil'kov, A.V.Voronin* // Mashinostroenie i avtomatizacija proizvodstva. Mezhvuz. sb. nauchn. tr. – SPb.: SZPI, 1995. – S. 54-67.103